

攀枝花典型大宗固废在建筑材料中的应用研究现状

冯丹, 李政灵, 李春洋, 王伟, 梁月华, 汪杰
(攀枝花学院土木与建筑工程学院, 四川攀枝花 617000)

[摘要] 攀枝花作为中国重要的工业基地,大宗工业固废的堆积问题日益严峻,其资源化利用对推动低碳建筑材料发展和实现可持续目标具有重要意义。本文系统综述了攀枝花市尾矿、冶炼废渣、煤矸石、脱硫石膏和污泥这五种典型工业固废在建筑材料领域的应用现状,重点分析了其在混凝土、砖、复合胶凝材料等领域的创新技术路径及应用成效。在此基础上,本文进一步评述了当前固废资源化过程中存在的主要问题,包括部分材料活性不足、规模化应用成本高、重金属浸出风险大等技术瓶颈。针对上述问题,提出应加强高效激发与稳定化技术研究,拓展固废应用场景与市场规模,创新资源化利用途径,并完善政策支持体系,从而推动攀枝花工业固废的高效循环利用,为实现“双碳”目标提供有力支撑。

[关键词] 固废资源化;尾矿;冶炼废渣;煤矸石;脱硫石膏;污泥;建筑材料

[中图分类号] X705 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)04-0072-08

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.04.011

0 引言

随着经济快速发展,全球固体废物产生量持续增加,固废处理和资源化利用已成为现代发展的重

要问题。“世界钒钛之都”攀枝花是中国重要的工业基地,拥有丰富的矿产资源,目前堆积了以煤矸石、尾矿、脱硫石膏、冶炼废渣等种类为主的大量固体废弃物。因其产生量大、利用率低,固废的堆积问题日益严重,若得不到有效处理,不仅占用大量土地,造成土地资源的浪费,而且固废中的有害物质会浸入土壤和水体中,对土壤、水体造成严重污染,影响生物和植被的生长,进而影响人类的生产、生活以及健康^[1]。党的二十大强调推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展,低碳化是实现高质量发展的关键环节,工业固废高值化利用是保护环境、走可持续发展的有效途径。地方政府对大宗工业固废的资源化利用给予了高度重视,《攀枝花市促进工业固体废物综合利用措施》(攀办规[2024]3号)明确:为工业固废综合利用重大项目保障用地开通“绿色审批通道”;对投资5000万元以上新项目按实际投资额给予1%补助,为获绿色建材认证的企业提供3万~8万元一次性奖励,对绿色建材使用比例达80%的工程项目实行评优倾斜;同时,鼓励培育废钢铁、废塑料等再生资源回收循环骨干企业,引导资源要素集聚,依托优势企业构建再生资源高值化利用体系,以助力实现国家“双碳”目标和党的二十大提出的生态优先、绿色低碳发展战略。

[收稿日期] 2025-04-22

[基金项目] “工业固态废弃物土木工程综合开发利用”四川省高等学校重点实验室开放基金(SC_FQWLY-2024-Z-03),攀枝花市科技计划项目(2024ZD-S-78,2024ZD-C-2),四川省大学生创新创业训练计划项目资助(202511360038、S202511360074)。

[作者简介] 冯丹(2001—),女,四川攀枝花人,硕士研究生,主要从事大宗工业固态废弃物土木工程综合利用应用研究工作。

[通信作者] 汪杰(1988—),男,四川乐山人,博士,硕导,副教授,高级工程师,攀枝花市学术技术带头人后备人选,长期从事大宗工业固态废弃物土木工程综合利用与绿色矿山生态修复研究工作。

[引用格式] 冯丹,李政灵,李春洋,等. 攀枝花典型大宗固废在建筑材料中的应用研究现状[J]. 绿色矿冶,2025,41(4):72-79,112.

FENG Dan, LI Zhengling, LI Chunyang, et al. Research status of application of typical bulk solid waste in building materials in Panzhihua[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(4):72-79,112.

建筑业是不可再生资源主要消耗领域,也是温室气体排放大户,全球范围内建筑活动的能源消耗占比达到36%,其二氧化碳排放量更是占全球总量的39%^[2]。研究固废在低碳建筑材料上的应用,既可实现资源的有效循环利用,也解决了固废污染环境的问题^[3]。从长远来看,使用固废基建筑材料能有效减少对天然资源的依赖和开采,节约资源,降低生产能耗,从源头上减少二氧化碳等温室气体的排放,实现绿色低碳发展。

本文系统综述了攀枝花市尾矿、冶炼废渣、煤矸石、脱硫石膏及污泥五种典型工业固废在建筑材料中的应用现状,分析了其在混凝土、砖、复合胶凝材料等领域的创新利用路径及实际效果,并提出目前存在的瓶颈以及展望了攀枝花市工业固废进一步的研究方向。

1 攀枝花市工业固废产生和利用现状

2024年,攀枝花一般工业固体废物产生量排名前五的行业依次为黑色金属矿采选业、化学原料和化学制品制造业、黑色金属冶炼和压延加工业、煤炭开采和洗选业、电力、热力生产和供应业,这些行业产生的固废量分别占全市一般工业固体废物产生量的76.80%、11.53%、7.69%、2.82%、0.38%。攀枝花市全力促进工业固废绿色化、规模化、高值化利用,目前绿色建材产品在新建建筑中应用占比约为70%,每年消耗工业固废1000万t以上。

根据攀枝花市生态环境局发布的攀枝花市固体废物污染防治信息,2020—2024年攀枝花市一般工业固废主要产生种类、产生量和综合利用量见表1,总产生量、综合利用量和利用率见表2。

表1 一般工业固体废物主要种类产生量和综合利用量

万t

| 固废种类 | 2020 | | 2021 | | 2022 | | 2023 | | 2024 | |
|------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | 产生量 | 利用量 |
| 尾矿 | 5 646.2 | 870.6 | 5 298.8 | 725.6 | 5 428.5 | 898.4 | 5 332.1 | 520.0 | 5 534.7 | 481.3 |
| 冶炼废渣 | 529.7 | 520.9 | 499.9 | 472.0 | 490.8 | 395.9 | 462.9 | 428.8 | 459.2 | 96.9 |
| 煤矸石 | 163.2 | 10.7 | 158.2 | 36.1 | 197.0 | 98.4 | 187.2 | 136.3 | 209.6 | 137.1 |
| 脱硫石膏 | 145.8 | 124.0 | 260.5 | 19.7 | 198.0 | 20.1 | 142.1 | 15.5 | 245.3 | 16.5 |
| 污泥 | 17.4 | 14.2 | 19.0 | 15.1 | 72.9 | 1.6 | 18.8 | 13.0 | 17.4 | 11.2 |

表2 攀枝花市一般工业固体废物产生量和利用率

| 年份 | 一般工业固废产生总量/万t | 一般工业固废综合利用量/万t | 一般工业固废利用率/% |
|------|---------------|----------------|-------------|
| 2020 | 7 139.20 | 1 553.09 | 21.75 |
| 2021 | 6 870.31 | 1 446.73 | 21.06 |
| 2022 | 7 097.93 | 1 589.36 | 22.63 |
| 2023 | 7 155.08 | 1 386.41 | 19.63 |
| 2024 | 7 432.36 | 1 277.47 | 17.19 |

从表1、表2中可见,近5年攀枝花市年均产生大宗工业固废约7000万t,产生量最大的5类依此为尾矿、冶炼废渣、煤矸石、脱硫石膏和污泥,固废整体利用率较低,约20%。

2024年攀枝花市一般工业固体废物利用能力前5的设施情况见表3。从表3可见,攀枝花市2024年前5家固废利用设施的产品终端高度集中于混凝土及关联建材,年总设计利用能力超千万吨

表3 攀枝花市2024年一般工业固体废物利用能力前5设施情况

| 利用设施所属单位名称 | 利用废物种类 | 产品名称 | 设计利用能力/(万t/a) |
|------------------|--------------------|-------|---------------|
| 攀枝花环业冶金渣开发有限责任公司 | 高炉渣 | 渣矿、碎石 | 480.0 |
| 攀枝花市润泽建材有限公司 | 尾矿砂 | 混凝土 | 350.0 |
| 攀枝花宏基商品混凝土有限公司 | 冶炼废渣、粉煤灰、磷渣粉 | 混凝土 | 337.9 |
| 攀枝花市州鑫混凝土有限公司 | 高钛重矿渣碎石、高钛重矿渣砂、粉煤灰 | 混凝土 | 120.0 |
| 攀枝花市天盟建材有限责任公司 | 磷渣 | 混凝土 | 70.0 |

级,既破解工业固废堆存的环境风险,又为区域建筑产业提供替代原料,打造了工业固废资源化的“攀

枝花模式”,为同类资源型城市的固废协同治理提供实践样本。

2 典型大宗工业固废应用研究现状

2.1 尾矿

钒钛磁铁矿经过破碎、研磨、分选等工艺提取有价值矿物后便产生钒钛磁铁矿尾矿。2024年,攀枝花市尾矿产生量为5 534.7万t,而利用量仅有481.3万t。钒钛磁铁矿尾矿中铝硅酸盐含量较高,还有镁氧化物以及少量的钾、钠、铁、硫氧化物^[4],与建筑材料成分相似。尾矿能和水化反应产物继续发生反应生成凝胶,使混凝土结构更加密实,可用作混凝土的掺合料。近年来,针对尾矿综合利用的研究已取得显著进展,攀枝花尾矿可用作混凝土骨料、水泥混合材、微晶玻璃原料等建筑材料。

2.1.1 混凝土

混凝土是第二大建筑材料^[5],攀枝花尾矿可应用于混凝土骨料和水泥混合材。毛雨琴等^[6]以攀枝花尾矿为骨料制备具有透水性的新型环保混凝土材料——透水混凝土,其实验结果表明透水混凝土透水性越好,抗压强度越低;当设计孔隙率为15%、水灰比为0.30时,透水混凝土抗压强度最大,达到29.2 MPa,并且透水系数 $>2\text{ mm/s}$,可满足轻型建筑对混凝土抗压强度及透水率的要求,为海绵城市建设提供可行方案。周永军^[7]使用最佳沥青用量3.8%,以攀枝花钢铁厂尾矿辉长岩轧制成的碎石作为粗集料,配套加工石屑作为细集料,以攀枝花石灰岩磨成的矿粉作为填充料制成混合料,并将其应用于攀田高速公路沥青路面下面层,该混合料不仅性能达到施工技术规范要求,而且降低沥青路面的施工成本(攀钢尾矿综合成本仅5元/t,远低于当地常规矿石20元/t的采购成本),但是由于工期和试验条件的限制,集料中金属成分对沥青路面耐久性的影响还需继续研究。攀枝花尾矿砂经筛分后可直接替代天然砂作为细骨料用于混凝土,其棱角状颗粒可提升混凝土界面性能。

尾矿磨成粉状后还可用作水泥混合材。李屹等^[8]使用钒钛尾矿粉和提钛渣完全替代水泥,制备钒钛尾矿基无熟料胶凝材料,既减少水泥的使用量,又降低工程成本和碳排放量。攀枝花尾矿中的铁、镁、铝等元素,在水泥制备中展现出显著优势,如适量的铁元素有利于提高水泥早期强度,铝元素能调节水泥的凝结时间等,因此,攀枝花尾矿还可用于制备镁铝铁水泥,但在研究过程中需要考虑尾矿中碱金属等物质对水泥性能的影响。

2.1.2 微晶玻璃、砖和陶瓷

尾矿含有 SiO_2 、 Al_2O_3 ,与微晶玻璃原料成分相近,而这两种成分正是玻璃相和陶瓷相形成的核心物质基础。泡沫微晶玻璃具有保温、隔音等优异性能,利用钒尾矿和废玻璃制备而成的微晶泡沫玻璃可广泛应用于建筑领域^[9]。

尾矿中的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ti^{4+} 化合物有利于瓷砖的烧结过程,改善其内部结构。李华彬等^[10]以钒铁磁铁矿尾矿为主要原料,结合昔格达黏土、长石等辅料,制备而成的尾矿瓷质砖色泽稳定,性能优于普通瓷质砖,经济效益显著。李林等^[11]以钒钛磁铁矿尾矿和废玻璃为基料,协同固废配置成储水泡沫陶瓷,材料中形成的硅灰石、钛铁矿、透辉石及长石等主要物相,为产品构建了良好的孔壁结构,使其具有孔隙率高、比表面积大、使用寿命长等特点。

在使用尾矿过程中要考虑其中的有害物质对人体的危害,因而需进行严格的检测和评估,采取有效的治理和防护措施。另外,利用攀枝花尾矿制备的空心砌块比重较大,不适用于高层建筑,可以考虑做成小型空心砌块。

2.2 冶炼废渣

攀枝花市冶炼废渣主要包括高钛高炉渣、钢渣、提钒尾渣等。其中,高钛高炉渣是高炉炼铁过程中产生的固体废弃物,在冶炼过程中,大量 TiO_2 因铁、钛紧密共生连在一起进入铁精矿中,含钛铁精矿在高炉还原时,铁优先被一氧化碳和碳还原为熔融生铁下沉,钛因性质稳定无法进一步被还原,与炉料中 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 等造渣组分结合,在高温下形成低熔点、高钛的复杂硅酸盐-铝酸盐熔渣,浮于铁水之上,经渣铁分离排出炉外,冷却后形成高钛高炉渣。高钛高炉渣中 TiO_2 含量高达20%~26%,其矿物组成主要有钙钛矿、攀钛透辉石和富钛透辉石等^[12],这些矿物组成的存在可能会影响混凝土的体积稳定性,降低反应性,限制其作为胶凝材料的使用。攀枝花高钛高炉渣的应用目前主要是作为掺和料、代替水泥、用作骨料、配置高强度绿色混凝土以及组合钢渣配置低碳混凝土。

钢渣作为钢铁冶炼的主要副产品,硬度大、成分复杂。在攀枝花地区建筑领域,钢渣主要应用于混凝土掺合料,在此基础上制备的混凝土具备良好的强度与耐久性^[13];同时,钢渣还可用作沥青混凝土集料。

提钒尾渣是钒矿提钒工艺过程中产生的固体废

弃物,通常含有硅、铁、铝、钙等氧化物,还可能残留少量未提取完全的钒及其他金属元素,可用作矿山充填胶凝材料,兼具环保与实用价值。

2.2.1 混凝土

高钛高炉渣强度高、耐磨性好、质地坚硬且杂质少,是制备混凝土集料和沥青集料的良好材料。李新华等^[14]以攀枝花高炉渣为原料,采用转鼓法干粒化制砂作混凝土的骨料。卿婷等^[15]的研究表明采用高钛矿渣砂替代河砂,不仅能有效减少胶凝材料用量,还可在一定程度上提升超高性能混凝土(UHPC)浆体的流动度与密度。黄濛等^[16]通过优化配合比和掺合料体系,掺入常规胶凝材料,且为避免混凝土强度波动较大,采用粒径较小、表面多孔的高钛高炉渣作为粗骨料制备混凝土。由于高炉渣的多孔结构使界面过渡区比普通骨料更为致密,砂浆的粘接面积更大,提升了界面粘结性能;在骨料孔隙之间砂浆填充形成销栓效应,提高混凝土强度;同时,一般高钛高炉渣骨料需提前预湿至饱和面干状态(含水率约为4%),孔隙中残存的结合水在后期持续参加水化反应,进一步提高高钛高炉渣混凝土的强度;最终设计出的高钛高炉渣混凝土强度达到81.8 MPa,加速碳化28 d碳化深度达到11 mm,84 d养护龄期氯离子迁移系数为 $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,早期抗裂达到IV级,满足高性能混凝土的强度和性能要求^[16]。卿婷^[17]以高钛矿渣砂为骨料制备超高性能混凝土,其28 d抗压强度达到138.5 MPa,流动度为215 mm,其强度和耐久性均优于天然河砂超高性能混凝土。王伟等^[18]研究发现高钛高炉渣作为一种碱性集料,其独特的物理特性使其与沥青的粘附性能远超玄武岩、石灰岩等传统沥青混合料集料,高钛高炉渣基质沥青、改性沥青AC-13、AC-20、AC-25混合料的低温J积分断裂能与断裂韧性、疲劳特性、粘弹性等性能与石灰岩沥青混合料相当,但其高温抗永久变形性能显著提升,为道路工程提供了高性能集料的选择。李林泽^[19]以高钛高炉渣制备自密实混凝土,在高钛高炉渣碎石粒径5~10 mm与10~20 mm的质量比为6:4,细度模数为2.6,砂率为0.58,砂胶比为2.8:1.0,粉煤灰掺量约为25%,水胶比为0.44~0.46,减水剂质量为水泥质量的1.8%条件下,制备的高钛高炉渣自密实混凝土具有良好的工作性能,28 d强度达到39.2 MPa。

高钛高炉渣微粉可作为混凝土掺和料、补充胶凝材料或填料应用。攀钢高钛高炉渣TiO₂含量高,

会生成大量无水硬活性的钙钛矿,导致玻璃体中CaO含量少、硅氧四面体聚合度高,水硬活性低,物理活性激发、化学活性激发热活化法对其活性激发效果不明显^[20]。但是随着水化龄期的延长,高钛高炉渣的潜在水硬性能得到更充分的发挥。其细化颗粒填充水泥空隙优化堆积结构,加速水化晶核形成推进反应,7~90 d逐步激发水硬性且激发剂可加速进程,同时减少泌水、改善界面、抑制氢氧化钙晶体生长,增强骨料与水泥浆体结合力,在混凝土中掺入20%~30%高钛高炉渣微粉后,其早期强度低于基准混凝土,后期强度则实现反超^[21]。

钢渣微粉可通过降低用水量来改善混凝土密实性,在水泥中掺入20%的钢渣和10%~20%的粉煤灰,制备得到的混凝土强度发展明显,其28 d抗压强度、抗折强度都达到了纯水泥熟料强度的80%以上,活性指数最高可达82.9,线膨胀率低于0.1%,无收缩现象发生,体积安定性良好^[22]。汪杰等^[23]研究表明钢渣比重为3.7,微观形貌不规则,粒径45 μm筛余为27%时,流动性差(流动性度比为92.5%),活性高(28 d活性指数为94.6%),易泌水;将其与粉煤灰制备复合掺和料,可改善性能,当两者按1:1比例混合时,流动度比为114.46%,活性指数为69.89%。王伟等^[24]利用钢渣粉与粉煤灰复合掺和料制备高钛高炉渣绿色低碳混凝土,由于钢渣微粉中的惰性RO相与游离的氧化钙参与后期水化反应,混凝土微观结构更致密,后期强度增长较大(520 d强度可达28 d强度的190%)。粗细骨料和掺和料固废资源综合利用可减少30%碳排放,随着时间的增长会进一步降低单位强度的碳排放量^[25]。

提钛炉渣可用作矿山充填胶凝材料。适量添加提钛炉渣,可增强充填体后期强度,但如果过量则影响激发与水化,可通过碱激发、石膏改性优化。在灰砂比1:4、水泥替代率为50%的条件下,充填体28 d抗压强度达到4.0 MPa,较纯水泥体系提高33%,且每立方米胶凝材料成本降低40%以上,这一举措既实现提钛炉渣资源化利用,又降低矿山充填成本^[26]。

将冶金固废微粉作为耐磨地坪填料是一个新的利用途径。高钛高炉渣中钛元素和金属氧化物等成分决定了地坪的性能,粒度适宜的渣料可以和地坪基材形成良好的结合,所制备的砂浆7 d、28 d的抗压强度分别为91.2 MPa和110.3 MPa,抗折强度分

别为 12.6 MPa 和 14.8 MPa, 耐磨度比为 441%, 表面压痕直径为 2.36 mm, 各项指标优于行业标准^[27]。高钛高炉渣微粉可替代常规的颜填料用于水性环氧地坪漆, 微粉中的 TiO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 可形成致密骨架, 且其含有的微量 Fe-Ti-Ca 玻璃相, 能在环氧固化时与胺固化剂发生界面螯合, 提升体系交联密度, 使水性环氧地坪漆摆杆硬度提升约 30%, 耐磨质量损失降低近 50%, 铅笔硬度从 2 h 提高至 3~4 h, 推动水性环氧地坪漆行业朝向更经济环保的方向发展^[28]。

2.2.2 泡沫微晶玻璃

泡沫微晶玻璃在建筑领域常用作建筑物的外墙保温材料、隔热隔音材料等, 应用前景广阔。LUO 等^[29]根据泡沫微晶玻璃的性能要求, 研究不同固废的物理化学性质, 选择高钛高炉渣、废玻璃和当地采石场的花岗岩尾矿制备泡沫微晶玻璃, 当尾矿掺量为 40% 时, 制备的微晶玻璃的体积密度和显微硬度分别为 3.0207 g/cm^3 和 8.6 GPa, 固体利用废物率超过 98%。王海波等^[30]利用高钛高炉渣-粉煤灰-废玻璃粉三元体系制备微晶泡沫玻璃, 产品孔径为 1.0~1.8 mm、表观密度 0.88~0.93 g/cm^3 、导热系数 0.21~0.32 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ 、吸水率 < 2.91%、抗压强度 $\geq 19.6 \text{ MPa}$, 质地均匀、机械强度高。Yan 等^[31]发现以 46% 的高钛高炉渣和废玻璃可以制备得到性能较优的吸声泡沫玻璃陶瓷, 其降噪系数达 0.41, 抗压强度为 10.5 MPa。整体而言, 利用高钛高炉渣制备泡沫微晶玻璃的开发利用目前仍处于小规模生产阶段。

2.2.3 砖和砖的衍生物

高钛高炉渣富含 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 等组分, 与黏土成分相似, 可在特定条件下使高炉渣内部的矿物转化, 形成致密的晶相, 赋予材料石材般的硬度和质感, 因此, 高炉渣是制备石材和砖的理想原料。杨志远等^[32]利用高钛高炉渣制备微晶石材, 获得的微晶石材表面平整、色泽纯正、质量好, 可广泛应用于建筑装饰领域, 提升建筑的美观性和耐久性。徐茂炎等^[33]以高钛高炉渣作为粗细骨料, 辅以水泥, 可制备与普通混凝土强度变化规律相似的仿石砖, 其抗压和抗折强度可分别达到 50 MPa 和 10 MPa; 水泥的掺量对仿石砖的性能影响显著, 因此需保证水泥用量, 控制水胶比。孙希文等^[34]以高钛高炉渣为主要原料, 以粉煤灰、石灰为胶凝材料, 制备得到强度达到 MU10 的矿渣砖, 其抗压强度为 13.8 MPa,

抗折强度为 3.3 MPa, 砂浆强度为 6.0 MPa 时, 抗剪强度为 0.57 MPa, 其砌体抗剪强度优于粉煤灰砖, 与黏土砖相当, 可用于建筑墙体材料。在制砖过程中需要继续优化配比, 控制高钛高炉渣的掺量和胶凝材料用量, 并根据需要加入一些添加剂以保证砖的性能要求。

2.3 煤矸石

煤矸石是煤炭开采和洗选过程中排放的固废。攀枝花市 2024 年煤矸石产生量达 209.6 万 t, 综合利用率约 65.4% (表 1)。由于不同煤矸石的岩石特征、硅铝比和含碳量等性质存在差异, 其用途不同。在攀枝花地区建筑材料领域, 煤矸石主要用于生产水泥、烧结砌块、骨料以及砖等材料。

攀枝花市煤矸石的成分与砂岩、黏土类似, 成分中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 SiO_2 占比达到 80% 等, 有害成分 MgO 、 SO_2 含量较少, 因而可以替代砂岩或黏土生产普通硅酸盐水泥^[35-36], 同时较高热值的煤矸石可作为燃料, 降低水泥生产煤耗。李培树等^[36]将低热值煤矸石与废弃耐火材料(镁碳砖、滑板砖)分别按质量占比 40%~70%、3%~15%、20%~50% 混合, 在温度 1320~1420 $^{\circ}\text{C}$ 环境下反应合成, 保温 2~6 h 后冷却, 可得到纯度较高的的堇青石-莫来石复相材料。曾勇华等^[37]利用煤矸石和选矿废渣制备烧结砌块, 选矿废渣: 煤矸石按 5:5~7:3 的质量比混合, 经破碎筛分、48~72 h 陈化、高压成型, 以及烘干-升温-烧结-降温工艺后, 制得空心砌块, 并建立生产线, 实现了固废资源的循环利用, 解决了传统的砌块生产依赖于黏土、页岩等天然资源的问题。此外, 煤矸石经高温烧结可制备轻型骨料, 进而配制成轻质混凝土, 所制备的混凝土密度小、强度高、吸水率小, 适用于装配式建筑预制件。

目前, 攀枝花煤矸石总体利用水平不高, 技术含量高的综合技术未能得到实践, 企业规模较小。此外, 根据煤矸石的特性, 还可以研究其在建筑保温材料、高温隔热材料、吸水材料等方面的应用, 提高煤矸石的附加值。

2.4 脱硫石膏

基于环保要求, 燃煤过程中需严格控制二氧化硫的产生, 因此常采用石灰石粉脱硫技术处置 SO_2 , 最终产生大量以二水硫酸钙为主要成分的脱硫石膏固体废弃物。攀钢集团与攀枝花市钢城集团有限公司球团厂正常生产时, 脱硫石膏产量为 40 万~45 万 t。2025 年, 其产出的脱硫石膏主要供应给当地水泥厂

用作缓凝剂。在资源化利用方面,四川蓝鼎新材料有限公司对烧结烟气脱硫产生的脱硫石膏进行深度开发,配套建设年产25万t的建筑石膏粉生产装置,推动脱硫石膏从工业固废向优质建筑材料转化。该公司以高品位脱硫石膏为原料生产的建筑石膏粉,可作为各类石膏基建材的核心原料。此外,攀枝花市绿建节能材料有限公司已形成成熟的工业副产石膏利用体系,可利用石膏生产新型墙体材料、石膏砌块及干混砂浆。

水膏比是直接影响脱硫石膏制品物理力学性能的关键因素,当水膏比为0.4时,采用脱硫石膏制备的砌块抗压强度最佳^[38]。掺加10%~20%的钛矿渣粉,可配制成较低水膏比且强度最佳的脱硫石膏,其绝干抗压强度高达23.84 MPa,较单一脱硫石膏提升10%~27%,且呈现出前期强度较低、后期强度显著增长的特性^[39-40]。钛石膏杂质含量高,其中的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 会阻碍二水硫酸钙的生长,降低石膏增强剂对钛石膏的增强能力,导致其强度变低^[41],而脱硫石膏物理性能好、纯净度高、不含 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,可替代钛石膏制备强度更高的复合胶凝材料,并且延长凝结时间^[42-43]。在脱硫石膏-钛石膏复合胶凝材料的基础上,加入钛矿渣固废材料,辅以水泥和石灰碱激发剂,可制备出三元固废胶凝材料。杨贺^[44]研究发现以脱硫石膏和钛石膏为主要原料制备的胶凝材料,早期强度来源于二水石膏的生成,二水石膏持续水化反应生成钙矾石,为后期强度持续增加提供支持;添加石灰碱激发剂后, CaO 遇水生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进一步促进钙矾石的生成,减少了二水石膏晶体的生成,并填补了二水石膏晶体间空隙;同时未水化的钛矿渣起到骨架支撑作用,形成钛矿渣-二水石膏晶体-钙矾石结构体系,使复合胶凝材料强度显著提高^[44]。杨贺等^[45]按照脱硫石膏和钛石膏质量1:1配比,再添加0.09%的石膏增强剂控制水膏比,制备出符合《建筑石膏》(GB/T 9776—2022)中2.0等级要求的复合胶凝材料,利用此胶凝材料制备空心砌块,其强度符合《石膏砌块》(JC/T 698—2010)的要求,但由于水化反应生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 以及二水石膏晶体间存在空隙,空心砌块的耐水性能较差,后续可以从添加耐水填料、优化生产工艺或者加入外加剂等方面进行优化,以降低孔隙率,提高砌块的耐水性。

2.5 污泥

污泥包括采矿除尘污泥、商品混凝土废液滤渣、高

钛渣集料制备或机制砂污泥等。攀枝花市污泥年产生量近20万t,2024年产生17.4万t,利用11.2万t,利用率为64.37%。在建材方面,攀枝花市污泥的应用主要是烧制砌筑材料、作为掺和料或填料再生制备砂浆和混凝土。

高钛高炉渣污泥是高钛高炉渣制备粗细集料过程中微粉与水的混合物经沉淀、压滤后形成的污泥状物质,含水率为8%~10%,其主要成分就是高钛高炉渣微粉,其干基含 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 等成分,与水泥熟料及活性混合材成分高度相似。污泥干燥能耗高,亦可湿拌直接用于砂浆、混凝土和烧结砖等建材生产^[46]。梁月华^[47]、汪杰等^[48]利用“湿法直掺”工艺,加入高钛高炉渣污泥7%~9%,制备了M5~M20级砂浆,其28d抗压强度7.2~29.7 MPa,节约水泥1.1%~1.4%;采用高钛高炉渣污泥制备全高钛渣混凝土,其坍落度为186~198 mm,28d抗压强度为33.37~58.78 MPa,比同级常规混凝土节约水泥1.5%~2.3%。由于高钛高炉渣污泥赋存状态为污泥状,其在攀枝花地区实际应用较少。

石灰石采矿除尘污泥是石灰石采矿和破碎砂材料生产过程中为减少扬尘,采用雾化喷水除尘而形成的污泥。和高钛高炉渣污泥一样,其主要成分是石灰石微粉,可干燥粉磨后作为石灰石微粉使用,或“湿法直掺”应用。混凝土浮浆是大体积混凝土浇筑振捣过程中,水泥浆、细颗粒和多余水分由于振动加速度大于连接力而上浮到表面的一层混凝土,其具有一定的流动性和短期可塑性。混凝土浮浆经回收利用可再生制备混凝土,利用“湿态浮浆全回用”工艺,在浮浆中补充水泥、集料和水,即可制备不同强度等级的新混凝土,其28d抗压强度可达30.02~32.66 MPa,可直接制备C30混凝土用于场地临时道路等非结构工程,该工艺可消纳全部浮浆、降低后期浮浆薄弱层凿除成本,不仅能有效减少废弃物排放,还能创造经济效益,为建筑行业的可持续发展提供助力^[49]。

攀枝花市污泥在回收利用上方面取得一定成效,但是目前还面临一些挑战。例如,污泥含水率高,无法满足卫生填埋要求和焚烧处置要求。为解决此类问题,可采用先进的污泥脱水技术,推广污泥深度脱水工艺,降低污泥含水率。

3 结束语

目前,攀枝花多源大宗固废在建筑领域的利用

已卓有成效,主要是作为掺和料、粗细集料应用于混凝土、水泥混合材,以及制作成砖、陶瓷和微晶玻璃等,并且这些高值化利用已经在不少实际工程中得到了应用。配制得到的产品在保证性能的同时降低了生产成本,不仅减少原材料的消耗,节约自然资源,还实现废弃物循环利用,解决了攀枝花市的环境问题。但仍存在不小挑战:攀枝花固废产生量大,利用率低;固废活性较低,采取研磨等活性激发方式成本较高;固废掺量受产品性能的影响,在建筑领域利用技术含量不高、规模较小,缺乏高值化和规模化利用技术和应用途径,规模化应用成本高;固废中的重金属成分溢出对人类和环境存在巨大的危害等。

在未来可进一步开发高效复合激发技术,提升固废活性;或考虑在纳米材料等领域扩大固废的应用,实现固废高附加值利用。扩大固废利用市场规模、创新固废利用途径,实现多学科、多领域技术交叉融合,促进固废产品多样化,可建立固废资源化示范基地,促进技术规模化应用,带头引领固废不断发展。解决有害成分处置问题,保证固废利用处理过程中的人员健康,完善环境风险评估体系,加强监管,制定有害物质成分的规范标准。政府应加大财政补贴,鼓励企业或科研单位研究利用固废基绿色建材,拓展应用场景,以此实现固废资源的高效循环利用,助力“双碳”目标达成,为全国工业城市绿色可持续发展提供参考。

[参考文献]

- [1] 孙坚,耿春雷,张作泰,等. 工业固体废弃物资源综合利用技术现状[J]. 材料导报,2012,26(11):105-109.
- [2] CHEN L, HUANG L, HUA J, et al. Green construction for low-carbon cities: a review[J]. Environment Chemistry Letter,2023,21(03):1627-1657.
- [3] REN C, HUA D, BAI Y, et al. Preparation and 3D printing building application of sulfoaluminate cementitious material using industrial solid waste[J]. Journal of Cleaner Production,2022(363):132597.
- [4] PENG Y, XIAO J, ZHANG Y, et al. Process mineralogy characteristics and titanium preconcentration of Panxi vanadium-titanium magnetite tailings[J]. Journal of Mines, Metals and Fuels,2019,67(6):332-338.
- [5] GAGG C R. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis[J]. Engineering Failure Analysis,2014(40):114-140.
- [6] 毛雨琴,沈新颖,朱路平,等. 攀枝花尾矿制备透水混凝土的实验研究[J]. 上海第二工业大学学报,2018,35(1):48-52.
- [7] 周永军. 攀钢尾矿用作路面沥青混合料配合比设计及施工[J]. 西南公路,2009(2):11-14,18.
- [8] 李屹,刘娟红,任艳丽,等. 一种钒钛尾矿基无熟料胶凝材料及其制备方法:118108431A[P]. 2024-03-06.
- [9] CUI P X, FENG Z, JIA H X, et al. Preparation of glass-ceramic foams using extracted titanium tailing and glass waste as raw materials[J]. Construction and Building Materials,2018(190):896-909.
- [10] 李华彬,何安西,邓天秀,等. 尾矿瓷质砖配方及烧成工艺研究[J]. 中国陶瓷,1999(1):31-33.
- [11] 李林,姜涛,陈超,等. 攀西钒钛磁铁尾矿制备储水泡沫陶瓷的研究[J]. 矿产综合利用,2020,(6):7-13,6.
- [12] 吴胜利. 高钛高炉渣综合利用的研究进展[J]. 中国资源利用,2013,31(2):39-43.
- [13] 程谢悦,王璐璐,冯寒,等. 钢渣物化性质及其制备透水砖工艺技术研究[J]. 中国有色冶金,2023,52(3):86-92.
- [14] 李新华,王雪松,刘知路,等. 高钛高炉渣综合利用新方向[J]. 钢铁钒钛,2009,30(3):10-16.
- [15] 卿婷,李晓英,赵杰,等. 高钛矿渣 UHPC 浆体的制备及性能研究[J]. 混凝土与水泥制品,2023,(11):77-81.
- [16] 黄濛,袁宇鹏,刘伟,等. 全攀西钒钛磁铁矿冶炼废渣骨料高性能混凝土试验研究[J]. 四川建材,2024,50(5):1-3,21.
- [17] 卿婷. 基于高钛矿渣的超高性能混凝土体系设计与性能研究[D]. 西南科技大学,2023.
- [18] 王伟,汪杰,梁月华. 高钛重矿渣作为集料用于沥青混合料的可行性分析研究[J]. 钢铁钒钛,2022,43(4):87-93.
- [19] 李林泽. 高钛型高炉渣自密实混凝土配制研究[D]. 西华大学,2016.
- [20] 周孝军,鲁莉,周贤良,等. 高钛型高炉渣粉的活性激发及其在混凝土中的应用[J]. 钢铁钒钛,2025,46(1):86-93,106.
- [21] 王怀斌,范付忠,郝建璋,等. 高钛高炉渣在混凝土中的作用机理[J]. 钢铁钒钛,2004,(3):48-53.
- [22] 钱强. 攀西钢渣作为水泥混合材的应用[J]. 中国水泥,2018(12):79-82.
- [23] 汪杰,梁月华. 电炉钢渣-粉煤灰复合掺合料水泥胶砂性能研究[J]. 钢铁钒钛,2022,43(5):123-128.
- [24] 王伟,汪杰,梁月华. 电炉钢渣微粉取代粉煤灰配制高钛重矿渣混凝土的试验研究[J]. 钢铁钒钛,2021,

- 42(4):79-84.
- [25] LIANG Y, WANG J. Effect of electric furnace steel slag powder on the strength of green low-carbon concrete with high-titanium blast furnace slag[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2024(89):102957.
- [26] 李杰林, 李奥, 郝建璋, 等. 提钛炉渣-铁基全尾砂-水泥胶结充填体配比实验研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(6):838-846.
- [27] 赵继涛, 余韵, 李厚鹏, 等. 攀西地区高钛高炉渣制备地坪耐磨层砂浆的试验研究[J]. 四川建材, 2024, 50(10):12-14, 17.
- [28] 周吉, 王彬, 苏达, 等. 一种高钛型高炉渣微粉型水性环氧地坪漆:115785769A[P]. 2023.03-14.
- [29] LUO Y L, WANG F, ZHU H Z, et al. Preparation and characterization of glass-ceramics with granite tailings and titanium-bearing blast furnace slags[J], Journal of Non-Crystalline Solids, 2022(582):121463.
- [30] 王海波, 孙青竹. 利用固体废弃物制备微晶泡沫玻璃的方法:108423997A[P]. 2018-08-21.
- [31] YAN Z D, FENG F Q, TIAO J, et al. Effect of high titanium blast furnace slag on preparing foam glass-ceramics for sound absorption[J]. Journal of Porous Materials, 2019(26):1209-1215.
- [32] 杨志远, 黄幼榕, 李要辉. 高钛高炉渣微晶石材及其制备方法:106746679A[P]. 2017-05-31.
- [33] 徐茂炎, 张远春, 龙钊永, 等. 高钛高炉渣仿石砖力学性能的研究[J]. 四川水泥, 2025(1):48-50.
- [34] 孙希文, 张建涛, 杨志远, 等. 高钛型建筑矿渣砖的研制[J]. 新型建筑材料, 2003(3):5-7.
- [35] 陈德谦, 蒋光华, 赵明荣. 采用攀枝花煤矸石替代砂岩配料的生产实践与效益分析[J]. 水泥工程, 2013(5):28-31.
- [36] 李培树, 杨海宾. 攀枝花煤矸石综合利用产业链探究[J]. 节能与环保, 2013(12):60-63.
- [37] 曾勇华, 谢国杰. 利用工业固废的烧结砌块及制造方法:119263779A[P]. 2025-01-07.
- [38] 迭健, 陈伟, 龙伟. 基于不同水膏比脱硫石膏砌块的抗压强度试验研究[J]. 建材与装饰, 2018, (49):54-55.
- [39] 杨贺, 梁贺之, 陈伟, 等. 高钛重矿渣粉复合胶凝材料强度突变机理分析[J]. 非金属矿, 2020, 43(4):99-102.
- [40] 杨贺, 陈伟, 梁贺之. 脱硫石膏-钛矿渣粉复合胶凝材料力学性能研究[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(6):67-72.
- [41] GAZQUEZ M J, BOLIVAR J P, VACA F, et al. Evaluation of the use of TiO₂ industry red gypsum waste in cement production[J]. Cement & Concrete Composites, 2013(37):76-81.
- [42] 杨贺, 陈伟. Fe(OH)₃对石膏增强剂提高钛石膏力学性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(5):78-83.
- [43] 杨贺, 梁贺之, 浦云鹤, 等. 钛石膏-脱硫石膏复合胶凝材料力学性能研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(2):99-102.
- [44] 杨贺. 石灰碱激发钛石膏复合胶凝材料强度机理分析[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(3):111-118.
- [45] 杨贺, 陈伟. 钛石膏空心砌块力学性能试验及水化机理分析[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(6):16-19.
- [46] ARSH K, MONDAL B C, MASUM M M H. Characterization of water treatment sludge and its implications on concrete and cement mortar as a partial replacement of cement[J]. Construction and Building Materials, 2025(458):139454.
- [47] 梁月华. 高钛渣污泥再利用制备高钛渣砂浆的方法:112811863A[P]. 2021-05-18.
- [48] 汪杰, 梁月华, 徐佳俊. 高钛渣污泥再利用制备全高钛渣混凝土的方法:112661453A[P]. 2021-04-16.
- [49] 汪杰, 梁月华, 王伟, 等. 混凝土浮浆回收利用制备同等强度混凝土的方法:109293289A[P]. 2019-02-01.

Research Status of Application of Typical Bulk Solid Waste in Building Materials in Panzhihua

FENG Dan, LI Zhengling, LI Chunyang, WANG Wei, LIANG Yuehua, WANG Jie
(School of Civil and Architecture Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China)

Abstract: As an important industrial base in China, the accumulation of bulk industrial solid waste in Panzhihua is becoming more and more serious. Its resource utilization is of great significance to promote the development of low-carbon building materials and achieve sustainable goals. This paper systematically reviewed the application status of five typical industrial solid wastes, including tailings, smelting waste,

tion and denitrification reactions, and the proportion of CH_4 emissions was 50.7%, mainly from the A2O sewage treatment process. The biochemical pool, the direct carbon emission equivalent of each quarter is different; the carbon emission generated by the power consumption of the equipment is 1 697.38 t, accounting for 99% of the total indirect carbon emission in the plant area. The total area of the plant that can be used to deploy distributed photovoltaic power generation equipment is 9 479.96 m^2 . It is calculated that the average daily power generation can reach 6 788.88 $\text{kW}\cdot\text{h}$, accounting for 85.5% of the total daily power consumption in the plant, and the carbon emissions that can be reduced account for 46.31% of the total carbon emissions. According to the calculation of investment cost, distributed photovoltaic can complete cost recovery in only 4.83 years, indicating that the distributed photovoltaic in sewage treatment plants can effectively reduce carbon emissions and has certain economic benefits in the long run.

Key words: sewage treatment plant; carbon emission accounting; carbon emission reduction; distributed photovoltaic power generation

(上接第 79 页)

coal gangue, desulfurization gypsum and sludge, in the field of building materials in Panzhihua City, and focused on the analysis of their innovative technical paths and application effects in the fields of concrete, brick and composite cementitious materials. On this basis, this paper further reviewed the main problems existing in the current solid waste recycling process, including technical bottlenecks such as insufficient activity of some materials, high cost of large-scale application, and high risk of heavy metal leaching. In view of the above problems, it is proposed that the research on efficient excitation and stabilization technology should be strengthened, the application scenarios and market scale of solid waste should be expanded, the ways of resource utilization should be innovated, and the policy support system should be improved, so as to promote the efficient recycling of industrial solid waste in Panzhihua and provide strong support for the realization of the goal of “dual carbon”.

Key words: utilization of solid waste; tailings; smelting waste; coal gangue; desulfurization gypsum; sludge; building materials